

# 加速度計測のための無線センサネットワークの 実用的な時刻同期手法の開発

澤田 茉伊<sup>1</sup>・志波 由紀夫<sup>2</sup>・竹淵 悟<sup>3</sup>・小国 健二<sup>4</sup>

<sup>1</sup>大成建設

(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail:swdmi-00@pub.taisei.co.jp

<sup>2</sup>大成建設 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail:shiba@ce.taisei.co.jp

<sup>3</sup>東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail:takebuti@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>4</sup>慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

E-mail:oguni@sd.keio.ac.jp

構造物や地盤の多点同時の加速度計測を行うための無線センサネットワークでは、センサノード間の時刻同期精度の確保が必須課題である。本論文では、ブロードキャストタイムスタンプによる無線センサネットワークの時刻同期手法を提案する。本手法の特徴は、i) 通信性能に優れた無線装置を適用し、ii) 各センサノードに2つのCPUを搭載し、タイムスタンプの処理と加速度データの収集をそれぞれのCPUに特化したこと、である。RC壁などの遮蔽のある実構造物内で時刻同期精度の検証実験を行い、センサノード間の送受信が確実に行われることと、数百 $\mu$ 秒の時刻同期精度を確保できることを確認した。

**Key Words :** *Sensor network, acceleration measurement, robust time synchronization, broadcast time stamp*

## 1. はじめに

地震時における挙動予測や耐震診断を目的として、橋梁等の長大構造物や比較的広い範囲の地盤において、多点同時の振動加速度計測を行うことがある。このような多点同時計測では、これまでは有線による計測が通常である。しかし、近年のMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による超小型・低価格の加速度センサの出現や小型高性能な無線デジタル通信モジュールの普及、PIC (Peripheral Interface Controller) 等組込みマイコンとも呼ばれるチップ化されたマイクロコントローラ技術の汎用化を背景に、小型でしかも現場における配線が不要な無線加速度センサおよびそのネットワークシステムの実用化が現実味を帯びてきており、近い将来の適用が期待される。

ただし、一般に、多数の無線センサノードを用いて行う計測では、「個々のセンサノードの位置同定」<sup>1)</sup> および「センサノード間の時刻同期」が問題となる。特に、振動のように時間的変化が大きい挙動の多点同時計測では、全ノードの時間軸を高精度に合わせる必要があり、後者の問題が重要である。

そこで本研究では、加速度計測を行う無線センサシステムの開発の一環として、実用的な時刻同期手法を考え、実際に開発中のセンサシステムに実装して時刻同期の実験を行い、その動作状況と精度を検証した。その結果、RC壁などの遮蔽のある構造物内においても安定した通信で、センサノード間の時間軸のずれは数百 $\mu$ 秒以下に抑えられ、本手法の有効性が確認された。以下に、本研究で用いた無線加速度センサネットワークシステムの概要、時刻同期手法および検証実験の方法と結果を示す。

## 2. システムの基本構成

図-1 に著者らが開発している無線センサネットワークシステムの全体イメージを示す。本システムは、サーバ、親ノードおよび子ノードから構成されており、データ通信は無線で行う。屋外で広範囲の多点同時観測をバッテリー駆動で行うため、無線通信には、消費電力が小さく、通信距離が長い(最大600m程度)、1250MHz帯の特定小電力無線を用いる。

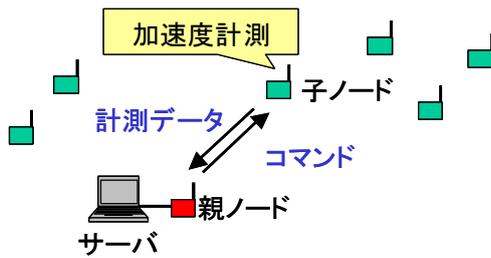


図-1 システムの全体イメージ

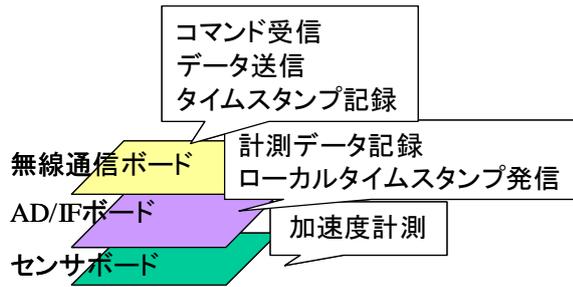


図-2 子ノードの構成

無線通信トポロジーは、すべての子ノードが親ノードに直接ぶら下がるシングルホップのスター型の構成としている。これは、高精度な時刻同期が確保された加速度データの計測・収集を行うには、マルチホップ型（ノード間を中継しながらリレー形式でデータ伝送を行う）は不向きであるためである。

親ノードは、子ノードに対してコマンドを送信し、子ノードの動作を制御する役割を担う。サーバは親ノードと接続されており、コマンドおよび計測データをシリアルデータで入出力するためのものである。

子ノードは、図-2に示すように、加速度センサを実装したセンサボード、ADインターフェースボード（以後、AD/IFボードと表記する）および無線通信ボードから構成されている。

AD/IFボードは、センサボードで計測・AD変換された加速度データをボード上のフラッシュメモリに書き込む役割をする。なお、現在のハードウェア構成では、16bitの3軸加速度データをサンプリングレート100SPS (samples per second) で計測した場合、約55分間記録可能である。

無線通信ボードは、親ノードとデータの送受信を行うためのものである。無線通信ボードとAD/IFボードの間はコネクタで結線された信号線で結ばれている。

子ノードは、親ノードから無線発信された「計測開始」のコマンドを受信すると、一斉に加速度計測を開始し、AD変換された加速度デジタルデータをメモリ内に収録する。そして計測終了後に、親ノードから「データ送信」のコマンドを受信すると、順次親ノードに計測データを送信する。

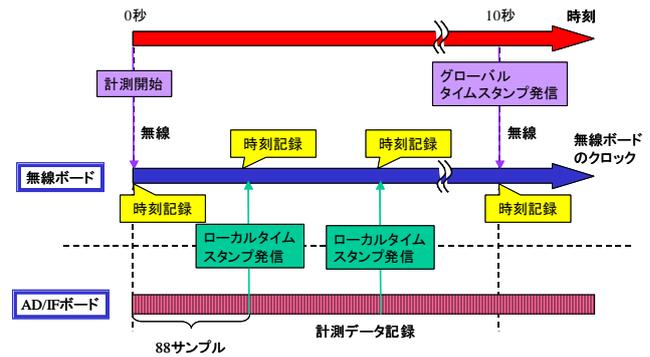


図-3 タイムスタンプの処理

### 3. タイムスタンプを用いた時刻同期手法

一般に、センサノードのCPUのクロックには個体差があるため、計測時間が長くなるほど、計測のタイミングのずれが大きくなる。この問題を解決するため、本研究では、タイムスタンプを用いた時刻同期手法を適用した。

親ノードは、前節で述べたように、コマンドノードとして働くが、同時にタイムスタンプ発行ノードとしての役割も担う。親ノードは、計測時間中に一定の時間間隔（例えば、10秒間隔）で、すべての子ノードに一斉に信号を送る（ブロードキャストとよぶ）。この信号をグローバルタイムスタンプとよび、それぞれの子ノードは、グローバルタイムスタンプを受信すると、このときの時刻を記録する。このように一定の時間間隔で、それぞれの子ノードが基準となる時間軸との関連付けをすることによって、子ノード間の時刻同期が確保される。

しかし、加速度データをAD変換し、書き込む作業をしている途中に、グローバルタイムスタンプ受信時刻の記録作業をさせる場合、後者の作業にCPUが占有され、サンプリングが停止し、計測データに欠損が生じてしまう。これらの二つの作業が重ならないようにする必要があるが、特に高いサンプリングレート（1000SPS以上）で計測を行う場合、このタイミングを正確に制御することが難しい。

本研究では、この問題を無線通信ボードとAD/IFボードで作業分担することにより回避している。無線通信ボードは、タイムスタンプの処理を担当し、AD/IFボードは、加速度データのAD変換および書き込み作業を担当する。このように個々のボードが作業分担することによって、欠損のないタイムスタンプ付き加速度時系列データの子ノード上に保存することができる。

AD/IFボードは、一定の個数（後述する実験では、ハードウェア構成の関係から88個と設定）のサンプルを行うごとに、無線通信ボードに信号を送る。この信号をローカルタイムスタンプとよび、無線通信ボードでは、グローバルタイムスタンプ受信時と同

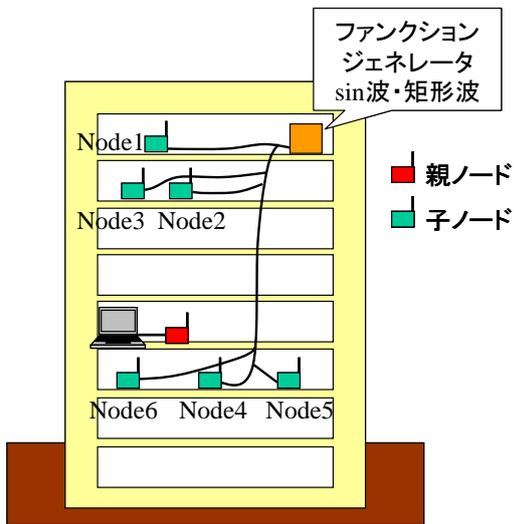


図-4 センサノードの配置図

様に、受信時刻を記録する。このように無線通信ボードで、二種類のタイムスタンプの受信時刻を記録することにより、サンプリングが基準となる時間軸のどこで行われたかを知ること、子ノード間の時刻同期が確保された加速度時系列データを得られる(図-3)。

#### 4. 構造物内部での時刻同期実験

RC造地上7階建の建物内部に、子ノードを6個設置し、センサネットワークを展開して、時刻同期精度の検証実験を行った。

##### [実験方法]

図-4 に示すように、親ノードおよびサーバを3階に設置し、子ノードを2階(3個)、6階(2個)、7階(1個)に設置した。それぞれの子ノードは、ファンクションジェネレータと有線につながれており、AD/IFボード上のCPUの10bitADコンバータでファンクションジェネレータからの信号を計測する。ファンクションジェネレータでは、sin波(周波数1Hz、振幅1.5V、直流成分2V)および同様の周波数、振幅および直流成分を持つ矩形波の2種類の波形を発生させた。計測のサンプリングレートは100SPSで、約30秒間計測を行った。

親ノードのグローバルタイムスタンプの発信のタイミングは、親ノードに接続されたファンクションジェネレータにより制御した。ファンクションジェネレータで周期10秒の矩形波を発生させ、その電圧の立ち下がり時にグローバルタイムスタンプを発信するようプログラムされている。矩形波の立ち上がり時間は10ns程度であるため、高精度に10秒間隔でグローバルタイムスタンプを発信させることができる。

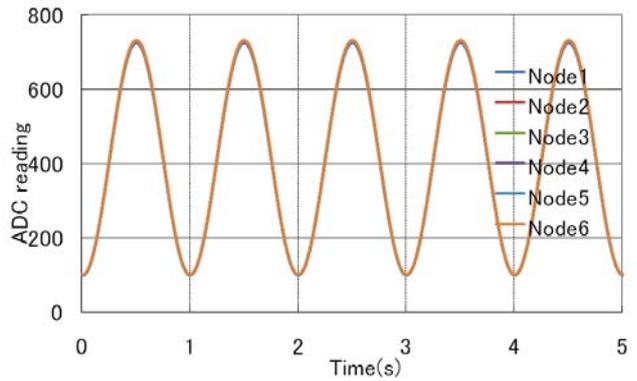


図-5 sin波の計測データ

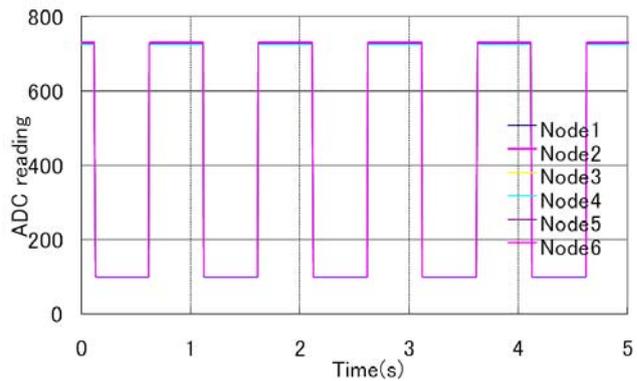


図-6 矩形波の計測データ

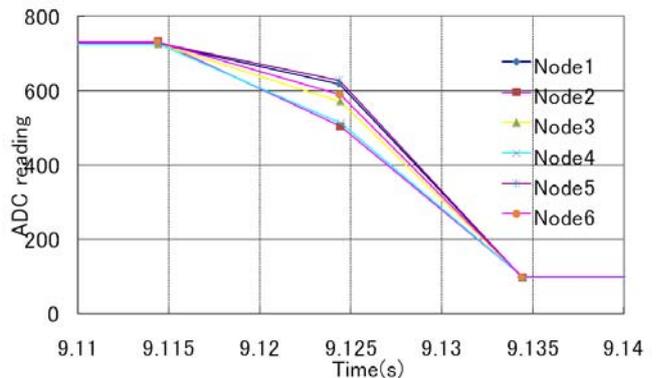


図-7 矩形波の立ち下がり部分

##### [実験結果]

構造物全体(階をまたいで、また、鉄筋コンクリートの壁による遮蔽を受けた場所も含んで)で、親ノードと子ノードの間のデータ送受信を安定して行うことに成功した。すべての子ノードが親ノードが発信したコマンドおよびグローバルタイムスタンプを100%受信することができ、また、親ノードも子ノードから送られたタイムスタンプ付計測データをほぼ完全に受信することができた。収集した計測データに一部欠損がみられたものの、すべての子ノードが99.97%以上のデータを受信できている。しかし、欠損がある加速度データを用いて、応答スペクトルを求める場合など、正確さが損なわれるため、今後は受信環境が良好でない現場環境も考慮し、欠損箇

所のデータ再送についても検討を進める。

次に、収集したタイムスタンプ付計測データより、6個の子ノードの時刻同期が確保された時系列データを作成する方法を示す。グローバルタイムスタンプおよびローカルタイムスタンプを用いて、センサノードのCPUのクロックの個体差を調整することにより、高精度な時刻同期が確保された時系列データを得ることができた。

[時系列データの求め方]

- ① 計測開始信号の受信時刻を0秒とする
- ② グローバルタイムスタンプ間を10秒とし、ローカルタイムスタンプを受信した時刻を求める
- ③ ローカルタイムスタンプ間（88データ存在・約880ms間）ごとにサンプリング間隔を求める
- ④ 計測データを計測時刻と対応させ、時系列データを作成する

図-5 および図-6 はそれぞれ子ノードに有線で接続されたファンクションジェネレータで発生させたsin波および矩形波を計測した時系列データである（約30秒の計測時間のうち、5秒間の計測データのみを示している）。

図-5および図-6では、6個の子ノードの計測データが完全に重なっており、信号計測、時刻同期ともに良好な精度を持つことが分かる。

さらに詳細な時刻同期精度を確認するため、矩形波の立ち上がり部分および立ち下がり部分の計測データに着目する。図-7 は矩形波が立ち下がる途中に計測が行われた部分を拡大したものである。それぞれの子ノードは、異なった電圧値を計測しているが、矩形波が立ち下がる時間は10nsと十分短いため、すべての子ノードで計測が同時に行われたといえる。このとき、図-7 において、それぞれの子ノードの計測時刻は、最小9.124349秒から最大9.124458秒の間に分布しており、誤差は109 $\mu$ 秒であった。

同様の解析を、他の立ち上がりおよび立ち下がり時に計測が行われた部分についても施した結果、最大誤差は145 $\mu$ 秒となった。

## 5. まとめ

無線センサネットワークを用いて、加速度を多点同時観測する際には、時刻同期を確保することが必須の課題である。本論文では、ブロードキャストタイムスタンプを用いた時刻同期手法を提案し、これを実装したシステムを用いて実証実験を行い、以下の知見が得られた。

- 通信性に優れた無線通信装置を採用したため、遮蔽物などが多い環境においても、安定したセンサノード間のデータ送受信を行うことが可能であった。
- タイムスタンプの処理と無線通信に役割を特化したCPUとデータ計測作業に特化したCPU、合わせて2つのCPUを個々のセンサノードに搭載することにより、高速サンプリングを行った際にもデータ計測に干渉しないタイムスタンプの処理が可能となった。
- グローバルタイムスタンプおよびローカルタイムスタンプを用いて、センサノードのCPUのクロックの個体差を調整することにより、最大でも誤差が数百 $\mu$ 秒の高精度な時刻同期が確保された時系列データを得ることができた。

今後の課題は、この無線センサネットワークを用いて、高い時刻同期を確保しながら加速度の3軸高精度計測を実現するために、ビット数の高い（16bit程度）高速AD変換装置を実装することである。また、計測精度向上のため、MEMS加速度計を用いた際に混入する高周波のノイズをカットする適切なフィルタ設計が必要である。

### 参考文献

- 1) 小国健二, 佐伯昌之, 井上純哉, 菅野高弘, 堀宗朗: 社会基盤センシングのための階層型センサネットワークの位置同定手法の開発, 土木学会論文集, 64, 1, 82-100, 2008.

## DEVELOPMENT OF ROBUST TIME SYNCHRONIZATION METHOD FOR WIRELESS SENSOR NETWORK

Mai SAWADA, Yukio SHIBA, Satoru Takebuchi and Kenji OGUNI

One of the most important topics in the research of wireless sensor network is the time synchronization among sensor nodes. Especially, acceleration measurement applications for civil infrastructure sensing require the synchronization at the highest level. This paper presents the broadcast time stamp based synchronization method. This method uses i) robust hardware for wireless communication, and ii) 2 CPUs for each sensor node. Each CPU on a node is specialized for i) processing of time stamp and ii) acceleration measurement. Robustness and the accuracy of the time synchronization has been experimentally evaluated and robust synchronization with the accuracy of hundreds of  $\mu$ s has been validated.